

**М. А. Прец, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев,
В. А. Вдовина, К. И. Зинурова**

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ-КЛАССИФИКАТОРА С СООСНЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Ключевые слова: воздушная классификация, фракционная эффективность, гидравлическое сопротивление, численное моделирование, пылеуловитель-классификатор.

В условиях ужесточения экологических нормативов по выбросам мелкодисперсных твердых частиц и роста доли технологических операций, связанных с обращением дисперсных материалов, особую актуальность приобретают энергоэффективные методы сухой газоочистки и фракционирования. Дополнительным фактором актуальности является необходимость обеспечения высокой селективности разделения при минимальном гидравлическом сопротивлении аппаратов, что напрямую определяет эксплуатационные и энергетические затраты промышленных систем. В работе проведено численное исследование инерционно-вихревого классификатора с соосно расположенными трубами, предназначенного для улавливания и разделения мелкодисперсных частиц в пылегазовых потоках. Отдельный практический интерес рассматриваемое устройство представляет для фракционирования металлических порошков, используемых в аддитивных технологиях изготовления элементов газотурбинного оборудования, где гранулометрический состав оказывает существенное влияние на стабильность процесса печати и воспроизводимость эксплуатационных характеристик деталей. Целью работы является оценка влияния соотношений площадей входа в аппарат, межтрубного пространства и входа в систему труб на фракционную эффективность улавливания частиц и гидравлическое сопротивление аппарата. Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent в трехмерной постановке с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST и лагранжевой модели дисперсной фазы (DPM). Проведено параметрическое варьирование соотношений характерных площадей входного сечения, межтрубного пространства и системы отвода мелкодисперсной фракции. Показано, что изменение базовой компоновки и отдельных геометрических параметров позволяет целенаправленно управлять положением области резкого роста фракционной эффективности в диапазоне размеров частиц 5-55 мкм, а также регулировать уровень потерь давления в широком интервале значений. Установлено, что достижение высоких показателей улавливания мелкодисперсной фракции возможно без усложнения конструкции и применения подвижных элементов, исключительно за счет геометрической настройки проточного тракта, что подтверждает перспективность предложенного классификатора для задач сухой газоочистки и классификации дисперсных материалов.

**M. A. Prets, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev,
V. A. Vdovina, K. I. Zinurova**

PARAMETRIC NUMERICAL SIMULATION OF A DUST COLLECTOR–CLASSIFIER WITH COAXIAL TUBES FOR CAPTURING FINE PARTICLES

Keywords: multi-vortex classifier, fractionation, bulk materials, separation, design parameters, classification efficiency, dust collector–classifier.

Under increasingly stringent environmental regulations on emissions of fine particulate matter and the growing share of technological operations involving the handling of dispersed materials, energy-efficient methods of dry gas cleaning and particle classification are becoming particularly important. An additional driver of relevance is the need to achieve high separation selectivity at minimal hydraulic resistance, which directly determines the operational and energy costs of industrial systems. This study presents a numerical investigation of an inertial–vortex classifier with coaxially arranged tubes, designed for the capture and separation of fine particles from dust-laden gas flows. The proposed device is of particular practical interest for the fractionation of metallic powders used in additive manufacturing of gas turbine components, where particle size distribution has a significant impact on process stability and the reproducibility of the mechanical and functional properties of printed parts. The objective of the work is to assess the influence of the ratios between the inlet cross-sectional area, the inter-tube annular space, and the inlet area of the tube system on the fractional capture efficiency and hydraulic resistance of the classifier. Numerical simulations were performed in the ANSYS Fluent software package using a three-dimensional formulation, the $k-\omega$ SST turbulence model, and a Lagrangian description of the dispersed phase based on the Discrete Phase Model (DPM). A parametric study was carried out by varying the ratios of the characteristic areas of the inlet section, the annular inter-tube region, and the fine-particle outlet system. The results demonstrate that changes in the basic layout and individual geometric parameters enable targeted control of the sharp rise region of fractional efficiency within the particle size range of 5–55 μm , as well as effective regulation of pressure losses over a wide range. It is established that high capture efficiency for fine particles can be achieved without structural complication or the use of moving parts, solely through geometric tuning of the flow path, confirming the prospects of the proposed classifier for dry gas cleaning and classification of dispersed materials.

Современные химические и смежные с ними технологические производства характеризуются устойчивым ростом доли операций, связанных с обращением дисперсных материалов, включая измельчение,

сушку, пневмотранспорт, гранулирование, получение катализаторов и адсорбентов, а также переработку пылевидных побочных и отходящих продуктов. На указанных стадиях технологического цикла формируются запыленные газовые потоки, а также

возникает необходимость управляемого фракционирования твердой фазы по размеру частиц, поскольку гранулометрический состав оказывает определяющее влияние на кинетику процессов тепло- и массопереноса, реакционную способность и реологические свойства сыпучих систем [1].

Отдельный практический интерес представляет фракционирование металлических порошков, используемых в аддитивных технологиях. При изготовлении элементов газотурбинного оборудования гранулометрический состав таких порошков существенно влияет на стабильность процесса печати и воспроизводимость характеристик деталей.

Ужесточение экологических нормативов и переход промышленных предприятий к более жестким требованиям по допустимым выбросам твердых частиц обуславливают смещение инженерного акцента от традиционных схем сухой газоочистки, ориентированных преимущественно на улавливание крупнодисперсной фракции [2], к аппаратам, обеспечивающим высокую эффективность улавливания и разделения мелкодисперсных частиц [3]. При этом выбор и проектирование газоочистных и классифицирующих аппаратов определяется не только достижимой степенью очистки и селективностью разделения, но и энергетическими затратами процесса, поскольку гидравлическое сопротивление напрямую связано с удельным энергопотреблением, эксплуатационными издержками и энергоэффективностью вспомогательных систем [4].

Дополнительный аспект актуальности рассматриваемой проблемы связан с обеспечением промышленной безопасности. В ряде отраслей, включая углеобогащение, производство и регенерацию сорбентов, порошковую химию и каталитические технологии, повышенная концентрация пылевых частиц в воздушной среде приводит к росту вероятности взрывоопасных и аварийных ситуаций, а также ускоренному износу оборудования. Это обуславливает необходимость применения технологически устойчивых, надежных и воспроизводимых решений для очистки и кондиционирования газовых потоков в широком диапазоне эксплуатационных режимов [5, 6].

Классические инженерные решения задач пылегазоочистки и фракционирования дисперсных систем принято классифицировать по преобладающему механизму разделения твердой и газовой фаз. Инерционные и центробежные аппараты, к которым относятся циклоны, вихревые и прямоочные циклонные устройства, а также многоциклонные системы, характеризуются конструктивной простотой, высокой термостойкостью, устойчивой работой при повышенных концентрациях твердой фазы и отсутствием расходных фильтрующих элементов [7, 8]. Эти особенности определяют их целесообразность применения в качестве предварительной ступени очистки газовых потоков. Существенным ограничением таких аппаратов является снижение эффективности при улавливании мелкодисперсной фракции, а также необходимость компромисса между степенью разделения и величиной гидравлического сопротивления, особенно при стремлении к характерным размерам разделения порядка 10-20 мкм [9, 10].

Фильтрационные аппараты, включая рукавные и картриджные фильтры, обеспечивают высокую степень улавливания мелкодисперсных частиц, однако требуют регулярного обслуживания и периодической замены фильтрующих элементов. Их эксплуатационные характеристики существенно зависят от температуры, влажности и адгезионных свойств пыли, а применение импульсных систем регенерации сопровождается ростом энергетических затрат и дополнительной нагрузкой на вспомогательные системы [11]. Электрофильтры способны обеспечивать высокую эффективность очистки при сравнительно низком аэродинамическом сопротивлении, однако отличаются повышенной капиталоемкостью, жесткими требованиями к электробезопасности и высокой чувствительностью к электрическим, дисперсным и физико-химическим свойствам аэрозольной фазы.

Мокрые методы газоочистки, реализуемые в скрубберах и аппаратах типа Вентури, позволяют достигать высокого уровня улавливания частиц, в том числе мелкодисперсных, однако сопровождаются образованием сточных вод, усложнением водно-химического режима и необходимостью последующей очистки жидких отходов. В задачах фракционирования сухих порошков широкое применение находят воздушные классификаторы статического и динамического типов, обеспечивающие регулируемую селективность разделения по размеру частиц [12,13]. Вместе с тем усложнение проточной части и наличие вращающихся узлов повышают требования к устойчивости аэродинамического режима, износостойкости элементов и точности настройки, а также ограничивают использование таких аппаратов при работе с абразивными и высокотемпературными средами [14,15].

В ряде публикаций последних лет рассматриваются подходы, направленные на повышение эффективности аппаратов разделения дисперсных систем, а также на разработку конструктивных решений, позволяющих совмещать функции газоочистки и классификации в рамках одного устройства [16,17]. В отношении циклонных аппаратов значительное внимание уделяется геометрическим способам стабилизации закрученного течения и снижению вторичного уноса уловленного материала. Результаты численных и экспериментальных исследований показывают, что целенаправленная модификация проточной части позволяет повышать эффективность улавливания при сохранении приемлемого уровня гидравлического сопротивления [18].

Для прямоочных и вихревых циклонных аппаратов продолжается развитие методик оценки эффективности разделения пылегазовых потоков с учетом режимных факторов, включая расход, концентрацию дисперсной фазы и особенности турбулентной структуры потока. Параллельно расширяется класс циклонных классификаторов, в которых разделение по крупности обеспечивается за счет специально организованной вихревой структуры течения. Для таких устройств представлены экспериментально-численные исследования новых схем течения и оценка се-

ллективности разделения, а также работы по статическим циклонным классификаторам с анализом полей скоростей и показателей разделения. Для динамических роторных классификаторов типичны исследования, ориентированные на совершенствование геометрии ротора и направляющих элементов, повышение эффективности и снижение удельного энергопотребления на основе вычислительного обоснования и сопоставления расчетов с экспериментальными данными [19]. Таким образом, сохраняется противоречие между обеспечением требуемой тонкости разделения и допустимым уровнем гидравлических потерь, а также высокая чувствительность эксплуатационных показателей аппаратов к геометрическим параметрам аппаратов.

Актуальным направлением является разработка новых конструктивных решений, пригодных для применения как в системах пылегазоочистки, так и в задачах фракционирования мелкодисперсных материалов, при одновременном снижении чувствительности характеристик к режимным отклонениям и упрощении эксплуатационной настройки.



Рис. 1 – Трехмерная модель классификатора в разрезе

Fig. 1 – Three-dimensional model of the classifier in the section

Авторами предложен и исследован инерционный классификатор с соосно расположенными трубами (рис. 1), конструкция которого включает внутреннюю и внешнюю коаксиальные трубы, систему труб для отвода мелкодисперсной фракции и бункер для сбора осажденных частиц.

Запыленный газовый поток подается во внутреннюю трубу и через щели поступает в кольцевое межтрубное пространство, где формируется вихрь. Разделение частиц происходит под действием инерционных и центробежных сил, более крупная фракция отбрасывается к стенкам и осаждается в бункере, а мелкодисперсные частицы уносятся восходящим потоком через систему труб, которые установлены в кольцевом пространстве, и удаляются через выход-

ной патрубков. Отличительной особенностью предлагаемого классификатора является коаксиальная компоновка труб с формированием развитого мультивихревого течения в кольцевом пространстве, обеспечивающая эффективное инерционно-центробежное разделение частиц без применения подвижных элементов.

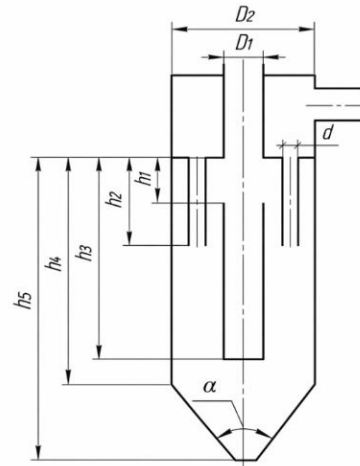


Рис. 2 – Геометрическая схема инерционно-вихревого классификатора с обозначением основных геометрических параметров: D_1 , D_2 – диаметры внутренней, внешней труб, d – диаметры трубок, находящихся в межтрубном пространстве, h_1 – высота щели во внутренней трубе, h_2 – высота трубок, h_3 – высота внутренней трубы, h_4 – высота внешней трубы от решетки до начала конического бункера, h_5 – полная высота внешней трубы с коническим участком, α – угол конического бункера

Fig. 2 – Geometric scheme of the inertial vortex classifier with the designation of the main geometric parameters: D_1 , D_2 – diameters of the inner, outer pipes, d – diameter of the tubes located in the inter-tube space, h_1 – height of the gap in the inner pipe, h_2 – height of the tubes, h_3 – height of the inner pipe, h_4 – height of the outer pipe from the grate to the beginning of the conic hopper, h_5 – total height of the outer pipes with a conical section, α – angle of the conical hopper

В условиях роста доли операций с дисперсными материалами, ужесточения требований к улавливанию мелкодисперсных частиц и необходимости снижения энергетических затрат требуется исследование факторов, определяющих эффективность и гидравлическое сопротивление пылеуловителей-классификаторов, включая влияние их геометрии и компоновочных соотношений.

Целью работы является оценка влияния соотношений площадей входа в аппарат, межтрубного пространства и входа в систему труб на фракционную эффективность улавливания частиц и гидравлическое сопротивление аппарата.

Численное моделирование выполнялось в ANSYS Fluent в трехмерной постановке на основе секторной расчетной области. На боковых гранях сектора зада-

вались симметричные граничные условия, обеспечивающие эквивалентность расчета полной геометрии при снижении вычислительных затрат [20].

Таблица 1 – Базовые геометрические конфигурации

Table 1 – Basic geometric configurations

База, №	1	2	3
Соотношение площадей	$F_{ex} \approx F_{кл}$	$F_{кл} \approx F_{тр}$	$F_{ex} \approx F_{тр}$
D_1 , мм	100	100	100
D_2 , мм	149	123	320
n_s , шт	16	30	6
F_{ex} , мм ²	7853.98	7853.98	7853.98
$F_{кл}$, мм ²	7853.99	2524.9	64233.98
$F_{тр}$, мм ²	1417.44	1217.32	7853.98

Течение газа рассчитывалось с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST. На входе во внутреннюю трубу задавалась скорость 10 м/с, на выходе применялось граничное условие pressure outlet. Сходимость решения контролировали по невязкам и стабилизации интегральных величин, включая массовый расход и перепад давления между входом и выходом.

Таблица 2 – Матрица расчетных вариантов для базы 1

Table 2 – Matrix of calculated options for base 1

Вариант, №	1	2	3	4	5	6
d , мм	11.6	–	–	–	–	–
h_1 , мм	42.6	–	60	87	–	87
h_2 , мм	87.2	–	–	–	–	–
h_3 , мм	120.5	–	–	–	160	–
h_4 , мм	141.8	–	–	–	180	–
h_5 , мм	184.4	–	–	–	220	–
k	0.5	1	–	–	–	1
Варьируемый параметр	Базовый вариант	Степень раскрытия	Параметры щели	Параметры щели	Высоты проточной части	Параметры щели

Дисперсная фаза моделировалась в лагранжевой постановке с использованием Discrete Phase Model (DPM). Частицы задавались инертными и сферическими с плотностью $\rho = 1000$ кг/м³. Расчеты выполнялись для размеров частиц a от 1 до 70 мкм с последующим построением фракционной характеристики эффективности $E(a)$. Взаимодействие частиц со стенками задавалось по зонам, то есть при столкновении с поверхностями трубок применялось условие отражения от стенок (reflect), а в области бункера – условие прилипания (trap). Фракционную эффективность $E(a)$ определяли как долю частиц заданного размера,

уловленных в аппарате, относительно общего числа введенных частиц данного размера.

Для количественной оценки влияния конфигурации проточного объема на гидравлическое сопротивление и фракционную эффективность улавливания было выполнено параметрическое варьирование геометрии классификатора. В основе параметризации лежала схема площадей, задаваемая тремя характерными площадями: площадь входного сечения $F_{вх}$, площадь кольцевого пространства (с вычетом площадей трубок) $F_{кл}$, площадь входа в систему трубок, расположенных в кольцевом пространстве $F_{тр}$, что позволило сформировать три базовые конфигурации аппарата при сохранении сопоставимости условий течения. Далее внутри каждой базовой конструкции последовательно изменялись геометрические размеры, определяющие характер формирования вихревой структуры в кольцевом пространстве и условия выхода мелкой фракции через трубки.

Таблица 3 – Матрица расчетных вариантов для базы 2

Table 3 – Matrix of calculated cases for Base 2

Вариант, №	1	2	3	4
d , мм	8	10	–	–
h_1 , мм	20.1	–	40.9	–
h_2 , мм	40.9	–	–	–
h_3 , мм	56.5	–	–	40.9
h_4 , мм	66.5	–	–	–
h_5 , мм	86.5	–	–	–
k	1	–	–	–
Варьируемый параметр	Базовый вариант	Параметры трубок	Параметры щели	Высота внутренней трубы

Перечень вариантов, использованных при параметрическом исследовании, приведен в табл. 1. Для каждой базовой конфигурации указаны исходные геометрические параметры аппарата (рис. 2), включая D_1 и D_2 , число трубок n_s , а также соответствующие значения характерных площадей. Нумерация вариантов соответствует принятым конструктивным модификациям внутри каждой базы.

Параметрические серии расчетов, сформированные для трех базовых конфигураций и их конструктивных модификаций, позволили получить сопоставимый массив данных по гидравлическому сопротивлению Δp и фракционной эффективности улавливания $E(a)$.

Расчетные варианты параметрического исследования для базовой конфигурации 1 приведены в табл. 2. К числу варьируемых параметров относились d , h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , h_5 и k . Вариант 1 принят в качестве базового, параметры, изменяемые относительно 1 варианта, выделены в таблице, тогда как остальные размеры принимались неизменными.

Расчетные варианты параметрического исследования для базовой конфигурации 1 приведены в табл. 2. К числу варьируемых параметров относились d , h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , h_5 и k . Вариант 1 принят в качестве базового, параметры, изменяемые относительно 1 варианта,

выделены в таблице, тогда как остальные размеры принимались неизменными.

Расчетные варианты параметрического исследования для базы 2 и 3 приведены в табл. 3 и 4. Вариант 1 принят в качестве базового.

Таблица 4 – Матрица расчетных вариантов для базы 3

Table 4 – Matrix of calculated cases for Base 3

Вариант, №	1	2	3	4
d , мм	41.8	25	–	–
h_1 , мм	191.4	–	120	–
h_2 , мм	391.6	–	–	–
h_3 , мм	541.2	–	–	361.2
h_4 , мм	636.9	–	–	–
h_5 , мм	828.3	–	–	–
k	1	–	–	–
Варьируемый параметр	Базовый вариант	Параметры трубок	Параметры щели	Высота внутренней трубы

В результате проведенного численного исследования получены зависимости, позволяющие установить, каким образом геометрия проточной части классификатора влияет на процессы формирования вихревой структуры и селективного переноса дисперсной фазы.

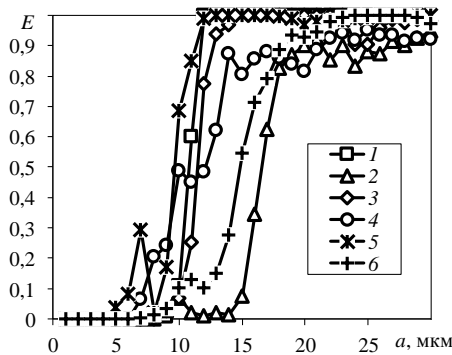


Рис. 3 – Фракционная эффективность улавливания частиц в зависимости от их размера для базы 1: 1 – Вариант № 1, 2 – Вариант № 2, 3 – Вариант № 3, 4 – Вариант № 4, 5 – Вариант № 5, 6 – Вариант № 6

Fig. 3 – Fractional particle capture efficiency depending on their size for base 1: 1 – Option № 1, 2 – Option № 2, 3 – Option № 3, 4 – Option № 4, 5 – Option № 5, 6 – Option № 6

Анализ фракционной эффективности улавливания $E(a)$ и гидравлического сопротивления Δp показал, что изменение соотношений характерных площадей и отдельных конструктивных параметров приводит к количественным изменениям характеристик и к качественному изменению режима сепарации, выражающемуся в смещении области резкого роста эффективности. Тем самым результаты исследования

отражают возможность управления граничным диаметром зерна и энергетическими затратами за счет изменения геометрических настроек аппарата, что подтверждается анализом представленных графических зависимостей для различных базовых конфигураций.

Фракционная эффективность улавливания $E(a)$ демонстрирует выраженную зависимость от геометрии аппарата (рис. 3). В зависимости от варианта конструкции область резкого роста эффективности располагается в интервале $a \approx 10-25$ мкм. Для кривых 1 и 3 наблюдается резкая селективная отсечка с увеличением эффективности от значений, близких к нулю, до $E \approx 0.95-1$ в узком диапазоне размеров частиц, а для линий 2, 4-6 рост эффективности носит более плавный характер. При размерах частиц $a \geq 20-25$ мкм все варианты обеспечивают высокую эффективность улавливания, превышающую 0.9, что свидетельствует о формировании устойчивого вихревого режима в кольцевом пространстве классификатора.

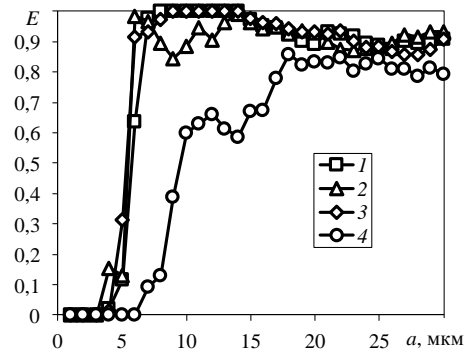


Рис. 4 – Фракционная эффективность улавливания частиц в зависимости от их размера для базы 2: 1 – Вариант № 1, 2 – Вариант № 2, 3 – Вариант № 3, 4 – Вариант № 4

Fig. 4 – Fractional particle capture efficiency depending on their size for base 2: 1 – Option № 1, 2 – Option № 2, 3 – Option № 3, 4 – Option № 4

Для базовой конструкции 2 зависимость фракционной эффективности от размера частиц (рис. 4) имеет более однородный характер по сравнению с базой 1. Для линий 1-3 наблюдается резкий рост эффективности уже при $a \approx 5-8$ мкм, с быстрым выходом на высокие значения $E \approx 0.9-1$. При дальнейшем увеличении размера частиц эффективность сохраняется на высоком уровне, однако отмечается умеренное снижение эффективности до 0.85-0.9 в области крупных частиц, что указывает на влияние геометрии на устойчивость режима улавливания. 4 линия отличается более плавным ростом эффективности, при котором значения $E \approx 0.8-0.85$ достигаются лишь при $a \geq 15-18$ мкм. В целом для базы 2 характерна более ранняя область диаметра отсечки и меньший разброс кривых, что свидетельствует о стабильном формировании вихревой структуры в кольцевом пространстве.

Для базы 3 зависимость фракционной эффективности улавливания $E(a)$ от размера частиц (рис. 5) характеризуется наибольшим разбросом форм кривых и высокой чувствительностью к геометрическим модификациям. В целом область роста эффективности

смещена в сторону крупных частиц и располагается в диапазоне $a \approx 25-55$ мкм. Для линии 4 наблюдается резкая селективная отсечка с быстрым увеличением E до значений 0.95-1 в узком интервале размеров, а для остальных вариантов рост эффективности носит плавный и протяженный характер.

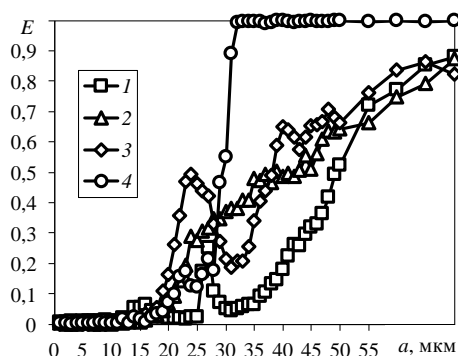


Рис. 5 – Фракционная эффективность улавливания частиц в зависимости от их размера для базы 3: 1 – Вариант № 1, 2 – Вариант № 2, 3 – Вариант № 3, 4 – Вариант № 4

Fig. 5 – Fractional particle capture efficiency depending on their size for base 3: 1 – Option № 1, 2 – Option № 2, 3 – Option № 3, 4 – Option № 4

При $a \geq 55-60$ мкм все варианты обеспечивают эффективность улавливания, превышающую 0.8, однако выраженность селективности существенно различается. Это указывает на определяющее влияние геометрии устройства на формирование вихревой структуры и характер сепарации в конфигурациях с увеличенным кольцевым пространством.

В таблице 5 приведены значения гидравлического сопротивления классификатора, определенные как перепад давления между входом и выходом аппарата для всех рассмотренных геометрических вариантов. Минимальное гидравлическое сопротивление достигается для базы 3, конструкции 1 за счет более равномерного распределения скоростей в проточной части, а максимальное – характерно для базы 2, конструкции 3, где усиливается ускорение и перераспределяется поток. Полученные результаты подтверждают, что гидравлическое сопротивление в рассматриваемом классификаторе определяется базовой компоновкой и характером локальных геометрических изменений проточного тракта.

Результаты численного моделирования показали, что предложенная конструкция классификатора с соосно расположенными трубами обеспечивает формирование устойчивой вихревой структуры, определяющей характер сепарации дисперсной фазы. Установлено, что за счет изменения соотношений площадей и отдельных геометрических параметров возможно управлять положением области резкого роста фракционной эффективности и выраженностью селективной отсечки по размеру частиц. При этом достижение требуемых характеристик улавливания реализуется без принципиального усложнения конструкции, исключительно за счет геометрической настройки проточного тракта. Полученные резуль-

таты подтверждают гибкость и адаптивность предложенного классификатора и свидетельствуют о его перспективности для задач сухой газоочистки и классификации дисперсных материалов.

Таблица 5 – Гидравлическое сопротивление для рассматриваемых конструкций

Table 5 – Hydraulic resistance for the structures under consideration

Номер конструкции	База		
	1	2	3
1	3540	2654	101
2	2882	2870	806
3	3041	4920	104
4	2940	4751	122
5	3425	-	-
6	2872	-	-

По результатам проведенного численного анализа сформулированы следующие выводы:

1. Область резкого роста эффективности смещается между базами: для базы 2 переход к значениям E , близким к 1, начинается при $a \approx 5-8$ мкм, для базы 1 – при $a \approx 10-25$ мкм, а для базы 3 – при $a \approx 25-55$ мкм, тем самым изменение базовой геометрии варьирует диаметр отсечки.

2. Наиболее эффективной для задач улавливания мелкодисперсной фракции является база 2 (с равенством площадей межтрубного пространства и трубок). Для нее характерна наиболее ранняя селективная область. Достижение $E \approx 0.9-1$ обеспечивается уже при $a \approx 5-8$ мкм, тогда как для базы 1 аналогичный уровень высокой эффективности в общем случае формируется при $a \geq 20-25$ мкм, а для базы 3 смещен в область крупных частиц и наблюдается значительно позже (рост в $a \approx 25-55$ мкм; $E > 0.8$ при $a \geq 55-60$ мкм).

4. Потери давления изменяются от 101 Па (база 3, конструкция 1) до 4920 Па (база 2, конструкция 3), что подтверждает возможность регулирования энергетических затрат процесса за счет геометрической настройки проточного тракта.

Работа выполнена в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИИШ», соглашение ИРПИШ от 19.12.2025г.

Литература

1. S. Hu, Y. Gao, F. Hu, G. Feng, C. Liu, J. Li, *Process Safety and Environmental Protection*, **153**, 311-319 (2021).
2. D. Misiulia, S. Antonyuk, A. G. Andersson, T. S. Lundström, *Powder Technology*, **364**, 943-953 (2020).
3. E. I. Salakhova, A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva, R. I. Gilmutdinova, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 622-626 (2024).
4. A. Skoromny, V. Pinchuk, A. Kuzmin, *Heliyon*, **10**, 11 (2024).
5. V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 5, 1790-1793 (2024).

6. R. Y. Bikkulov, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, T. M. Takhaviev, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 544-548 (2024).
7. В. С. Топталов, Ю. Г. Чесноков, В. П. Мешалкин, Н. Н. Кулов, О. М. Флисюк, Н. А. Марцулевич, И. Г. Лихачев, *Теоретические основы химической технологии*, **57**, 4, 363-370 (2023).
8. Z. Sun, F. Qian, X. Liu, H. Zhang, Y. Huang, *Chemical Engineering Research and Design*, **145**, 141-149 (2019).
9. V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 832-837 (2024).
10. В. Э. Зинуров, И. Н. Мадышев, А. А. Каюмова, К.С. Моисеева, *Ползуновский вестник*, **2**, 108-116 (2022).
11. V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 5, 1790-1793 (2024).
12. F. Jia, X. Mou, Y. Fang, C. Chen, *Processes*, **9**, 6, 1033 (2021).
13. H. A. Petit, E. F. Irassar, *Powder Technology*, **390**, 417-427 (2021).
14. X. Mou, F. Jia, Y. Fang, C. Chen, *Processes*, **9**, 7, 1148 (2021).
15. Q. Li, X. Mou, Y. Fang, *Processes*, **10**, 5, 874 9 (2022).
16. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, *Chemical and Petroleum Engineering*, **57**, 7-8, 531-537 (2021).
17. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, A. M. Muginov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 645-650 (2024).
18. Z. Sun, Q. Liu, X. Yu, *Advanced Powder Technology*, **30**(10), 2276-2284 (2019).
19. F. Jia, X. Mou, Y. Fang, C. Chen, *Processes*, **9**, 6, 1033 (2021).
20. E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 617-621 (2024).
3. E. I. Salakhova, A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva, R. I. Gilmutdinova, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 622-626 (2024)
4. A. Skoromny, V. Pinchuk, A. Kuzmin, *Heliyon*, **10**, 11 (2024)
5. V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 5, 1790-1793 (2024)
6. R. Y. Bikkulov, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, T. M. Takhaviev, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 544-548 (2024)
7. V. S. Toptalov, Y. G. Chesnokov, V. P. Meshalkin, N. N. Kulov, O. M. Flisyuk, N. A. Martsulevich, I. G. Likhachev, *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, **57**, 4, 363-370 (2023)
8. Z. Sun, F. Qian, X. Liu, H. Zhang, Y. Huang, *Chemical Engineering Research and Design*, **145**, 141-149 (2019)
9. V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 832-837 (2024)
10. V. E. Zinurov, I. N. Madyshev, A. A. Kayumova, K.S. Moiseeva, *Polzunovskiy Vestnik*, **2**, 108-116 (2022)
11. V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 5, 1790-1793 (2024)
12. F. Jia, X. Mou, Y. Fang, C. Chen, *Processes*, **9**, 6, 1033 (2021)
13. H. A. Petit, E. F. Irassar, *Powder Technology*, **390**, 417-427 (2021)
14. X. Mou, F. Jia, Y. Fang, C. Chen, *Processes*, **9**, 7, 1148 (2021)
15. Q. Li, X. Mou, Y. Fang, *Processes*, **10**, 5, 874 9 (2022)
16. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva, *Chemical and Petroleum Engineering*, **57**, 7-8, 531-537 (2021)
17. V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva, A. M. Muginov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 645-650 (2024)
18. Z. Sun, Q. Liu, X. Yu, *Advanced Powder Technology*, **30**(10), 2276-2284 (2019)
19. F. Jia, X. Mou, Y. Fang, C. Chen, *Processes*, **9**, 6, 1033 (2021)
20. E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **58**, 3, 617-621 (2024)

References

1. S. Hu, Y. Gao, F. Hu, G. Feng, C. Liu, J. Li, *Process Safety and Environmental Protection*, **153**, 311-319 (2021)
2. D. Misiulia, S. Antonyuk, A. G. Andersson, T. S. Lundström, *Powder Technology*, **364**, 943-953 (2020)

© **М. А. Прец** – ст. преп. кафедры Инженерной графики (ИГ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, precmari@mail.ru; **В. Э. Зинуров** – к.т.н, и.о. зав. кафедрой ИГ, КГЭУ, vadd_93@mail.ru; **А. В. Дмитриев** – д.т.н., проф., зав. кафедрой Автоматизации технологических процессов и производств, КГЭУ, ieremiada@gmail.com; **В. А. Вдовина** – студент, КГЭУ, vik.ktor.ria@mail.ru; **К. И. Зинурова** – студент, КГЭУ, karinarazakova14@gmail.com.

© **M. A. Prets** – Senior Lecturer, Department of Engineering Graphics (EG), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia, precmari@mail.ru; **V. E. Zinurov** – PhD (Technical Sci.), Acting Head of the of EG department, KSPEU, vadd_93@mail.ru; **A.V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Productions, KSPEU, ieremiada@gmail.com; **V. A. Vdovina** – Student, KSPEU, vik.ktor.ria@mail.ru; **K. I. Zinurova** – Student, KSPEU, karinarazakova14@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 15.12.25.

Дата принятия рукописи в печать – 18.04.26.